HVDC换相失败引发次同步振荡现象分析

王彤彤[1]，文 俊[1]，靳海强[1]，张汉花[2]

（1. 华北电力大学电气与电子工程学院，北京 102206；2. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院，宁夏 银川 750002）

摘要：建立了适用于次同步振荡分析的汽轮发电机组轴系扭振数学模型，介绍了发电机组轴系扭振的机理，重点分析了发电机组与HVDC之间的机电扭振作用。受端电网故障导致逆变站换相失败，会引起整流站附近的汽轮发电机组轴系扰动，并引起发电机电磁转矩的变化，而HVDC控制系统的快速作用为扰动提供了负阻尼，从而形成一种正反馈性质的扭振相互作用，助增轴系扰动幅值，最终导致汽轮发电机组次同步振荡现象的发生。在PSCAD/EMTDC上搭建相应模型，仿真再现了由HVDC换相失败引起的次同步振荡现象，并对其产生机理进行验证。

关键词：高压直流输电；换相失败；次同步振荡；轴系扭振

Analysis of subsynchronous oscillation caused by HVDC commutation failure

WANG Tongtong[1], WEN Jun[1], JIN Haiqiang[1], ZHANG Hanhua[2]

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Ningxia Electric Power Reasearch Institute, State Grid, Yinchuan 750002, China)

Abstract: The mathematical model of HVDC transmission system and its control system for subsynchronous oscillation analysis is established. Based on the torsional vibration model of generator shaft, the mechanism of generator shaft torsional vibration is introduced; the generator set and HVDC transmission are mainly analyzed. When the commutation failure occurs in the inverter station, it will cause the turbine generator shaft system disturbance near the rectifier station, which will cause problems in the HVDC system control and provide negative damping for the disturbance, thus forming a torsional vibration interaction with positive feedback properties. Eventually, the generator is subjected to shaft torsional vibration. Finally, the corresponding simulation model is built on PSCAD/EMTDC, the simulation reproduces the phenomenon of subsynchronous oscillation caused by the failure of HVDC commutation and verifies its mechanism.

Key words: HVDC transmission; commutation failure; subsynchronous oscillation; torsional vibration

0 引言

高压直流输电（High Voltage Direct Current，HVDC）具有输电容量大、功率快速可控等优点，在我国输电网中得到广泛应用[1-2]。然而，HVDC有可能引发汽轮发电机组的次同步振荡（Subsynchronous Oscillation，SSO）风险[3]。严重的次同步振

荡可能导致汽轮发电机组转子轴系扭振，危及转子的机械性能，缩短使用寿命，甚至导致轴系断裂[4]。

国内外已经相继发生多起HVDC引发次同步振荡的实例，例如美国的Square Butte直流工程、国内的贵广Ⅱ回直流工程和东北—华北高岭背靠背直流工程[5]。研究表明，HVDC的快速控制可能会引起电力系统的次同步振荡现象。

本文首先分析了HVDC引发汽轮发电机组次同步振荡的机理，进而分析在受端电网故障导致换相失败的情况下，逆变站换流阀的通断规律及各电气量的变化情况，得出换相失败的原因，即由于受网电压大幅下降导致换相失败的发生。并且在换相失败期间直流侧短路，短路电流全部由送端电网经过整流站提供，对整流站附近的汽轮发电机功率和转矩造成冲击，激发汽轮发电机较高幅值的轴系扭振，从而形成次同步振荡的风险。最后仿真再现了由HVDC换相失败引起的次同步振荡现象。

1 汽轮发电机组轴系扭振机理

1.1 次同步振荡产生原因分析

考虑简单的辐射电网，其电力系统的振荡频率为

$$f_{er}=f_0\sqrt{\frac{X_c}{X''+X_L+X_T}} \tag{1}$$

式中，f_0为额定频率；X_C为额定频率下线路的容抗；X''、X_L及X_T分别为额定频率下汽轮发电机次暂态电抗、线路电抗及变压器的电抗。

当汽轮发电机定子绕组中出现自然振荡频率f_{er}的电流时，转子绕组中会感应出频率为f_r的交流电流，二者存在如下关系

$$f_r=f_0\pm f_{er} \tag{2}$$

这是由于频率为f_{er}的三相电枢电流会在定转子气隙中产生正序和负序的旋转磁场，这两个磁场的角速度均为$2\pi f_{er}$，它们在转子上感应出的电流频率由旋转磁场和转子间的相对速度决定。其中，定子电流正序分量产生次同步频率$f_r=f_0-f_{er}$的转子电流分量，负序分量产生超同步频率$f_r=f_0+f_{er}$的转子电流分量。这些转子电流会在气隙中产生相应的磁链，从而与定子磁场共同作用产生电磁转矩，但由于次同步频率下的定子磁场较小，由此形成的电磁转矩可忽略。因此可以假定转子电流恒定。当恒定的转子磁场和电枢绕组产生的次同步磁动势相互作用时，就会产生次同步转矩。

大型汽轮发电机组的转子系统非常复杂，包括叶轮、叶片、转子铁心和励磁绕组、励磁机转子铁心及励磁绕组等，分别安装在转子轴系的不同轴段上，各部分的几何尺寸和转动惯量均不同[6]。当转子系统出现转矩不平衡时，各轴段之间的相对角位移就会发生变化。此外，转子轴系具有不同频率的扭振模态，在转子平衡运行状态下，如果对转子轴系施加周期变化转矩，转子各个轴段之间的相对角位移会出现一个幅值稳定的交变分量，对于不同的轴段，该交变分量的幅值和相位也不同。

因此，在研究汽轮发电机组轴系扭振问题时，应考虑轴系弹性的影响，汽轮发电机组轴系可看作由若干弹性连接的集中质量块构成[4]，包括高压缸（HP）、中压缸（IP）、低压缸A（LPA）、低压缸B（LPB）、发电机（GEN）和励磁机（EXC），结构如图1所示。次同步振荡的本质是受扰轴系中各质量块在同步旋转的同时，还会发生相对的扭转振荡。若轴系对该扭转振荡的阻尼为负，则可能会造成汽轮发电机组轴系持续甚至增幅的机械振荡。

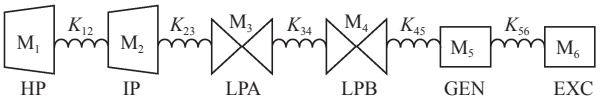

图1 汽轮发电机轴系结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of steam turbine shafting structure

1.2 汽轮发电机组轴系扭振的数学模型

以两个质量块轴系为例分析汽轮发电机组轴系扭振的产生原因。设质量块M_1和M_2的惯性

时间常数、角速度和质量块相对于参考轴系的相对角位移分别为T_1、T_2、ω_1、ω_2及δ_1、δ_2，质量块连接处的弹性系数为K_{12}，假设其在运动过程中无机械阻尼，则在无外力作用时，两个质量块各自的运动方程为

$$\begin{cases} T_1\dfrac{\mathrm{d}^2\Delta\delta_1}{\mathrm{d}t^2}+K_{12}(\Delta\delta_1-\Delta\delta_2)=0 \\ T_1\dfrac{\mathrm{d}^2\Delta\delta_2}{\mathrm{d}t^2}+K_{12}(\Delta\delta_2-\Delta\delta_1)=0 \end{cases} \tag{3}$$

将方程组线性化，并化简为如下矩阵形式

$$\begin{bmatrix} T_1p^2 & 0 \\ 0 & T_2p^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} K_{12} & -K_{12} \\ -K_{12} & K_{12} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix}=0 \tag{4}$$

该方程组的特征方程为

$$\begin{vmatrix} T_1p^2+K_{12} & -K_{12} \\ -K_{12} & T_1p^2+K_{12} \end{vmatrix}=0 \tag{5}$$

解得特征根为

$$\begin{cases} p_{1,2}=0 \\ p_{3,4}=\pm\mathrm{j}\sqrt{K/T}=\pm\mathrm{j}\omega_n \end{cases} \tag{6}$$

式中，K为轴系刚度，$K=K_{12}$；T为等效质量块的惯性时间常数，$T=T_1T_2/(T_1+T_2)$；ω_n为自然扭振角速度。

式(6)中$p_{3,4}$为一对共轭复根，表明两个质量块在有扰动发生时，会做角速度为ω_n的相对扭振。在有阻尼的情况下，扭振将会不断衰减。且自然扭振角速度ω_n与轴系刚度K的二次方根成正比，与等效质量块的惯性时间常数T的二次方根成反比。

2 HVDC引发次同步振荡机理

设汽轮发电机组G经电网等效阻抗Z_s与HVDC的整流站Rec相连，HVDC的逆变站Inv与受端电网相连，如图2所示。

HVDC与汽轮发电机组之间的相互扭振作用是由HVDC的快速闭环控制引起的，其产生机理可用图3加以解释。

忽略汽轮发电机组（以下简称发电机）

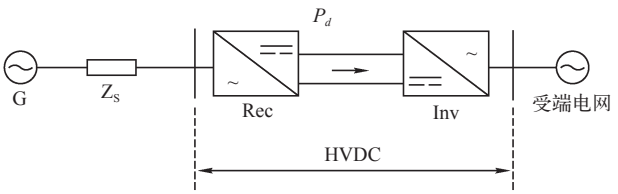

图2 汽轮发电机组与HVDC接入电网示意图

Fig. 2 Schematic diagram of generator and HVDC access to the power grid

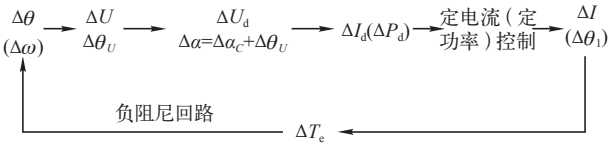

图3 HVDC诱发次同步振荡机理

Fig. 3 SSO generation mechanism of HVDC

与整流站之间的等效阻抗Z_s，即认为发电机与HVDC紧密耦合，如果该发电机转子角速度产生$\Delta\omega$的微小扰动，其相对角位移为$\Delta\theta=A\sin\Delta\omega t$，这将引起发电机机端电压幅值与相位的变化，变化量分别为ΔU和$\Delta\theta_U$，换流母线电压幅值与相位也会产生相应的摄动。换流母线相位的改变会使整流器的触发角产生相应的变化$\Delta\alpha$，从而导致直流电压和电流的摄动；换流母线电压幅值的改变，同样也会使直流电压和电流产生摄动。上述两者的共同作用将导致直流电流（或直流功率）偏离平衡状态，而HVDC的定电流控制（或定功率控制）将感应到这种变化并加以快速调动，从而导致发电机电磁转矩产生ΔT_e的摄动。如果发电机角速度的变化量$\Delta\omega$与由此引起的电磁转矩变化量ΔT_e之间的相位差超过90°，即对此扰动出现负阻尼[7]，如果该负阻尼强于该频率扰动下发电机的机械正阻尼，则将形成正反馈的扭振相互作用，从而不断助增摄动幅值，最终导致轴系扭振失稳[8]。

具有定电流（或定功率）控制的HVDC所传输的功率与电网频率无关，因此HVDC对汽轮发电机组的频率振荡不起阻尼作用，对汽轮发电机组的次同步振荡也不起阻尼作用，但这不足以引发汽轮发电机组次同步振荡不稳定。只有当一系列不利因素同时发生时，才有可能

导致次同步振荡不稳定，这些不利因素包括[9]：

1）汽轮发电机组与整流站间的电气距离很近。

2）汽轮发电机组与交流电网联系薄弱，如孤岛运行方式。

3）汽轮发电机组的额定功率与直流输电的额定功率为同一数量级。

因此，汽轮发电机组与交流电网之间的联系强弱对于次同步振荡的产生起着非常重要的作用。常规电力负荷随电网频率的变化而改变，对汽轮发电机次同步振荡起阻尼作用。但当汽轮发电机与交流电网联系很弱时，阻尼就不起作用了。

此外，当HVDC的输送功率大部分由附近的汽轮发电机组提供时，功率振荡基本发生在整流站和附近的汽轮发电机组之间，如果直流输电系统与附近的汽轮发电机具有相近的额定容量，也很有可能导致次同步振荡现象的发生。

3 逆变站换相失败引起次同步振荡机理

3.1 逆变站换相失败过程分析

当逆变器两个换流阀进行换相时，如果换相过程未完成，或预计关断的换流阀关断后，在承受反向电压期间未能恢复阻断能力，当加在该换流阀上的电压为正时，立即重新导通，预计开通的换流阀又重新关断，这种现象称为换相失败[10]。

以下基于国际大电网会议（CIGRE）推荐的高压直流输电标准测试模型（HVDC Benchmark），分析受端电网扰动导致逆变器换相失败的情况下换流阀电流的变化规律。以其中6脉动逆变器为例，其原理图如图4所示。图4中VT_1～VT_6为换流阀；L_d为平波电抗器；u_d为整流电压；i_d为直流电流，方向由整流器流向逆变器。

设置换流母线在2 s时发生a相接地故障，故障持续0.1 s后切除。仿真结果如图5所示。图5中由上至下依次为逆变站换流母线电压u_b、

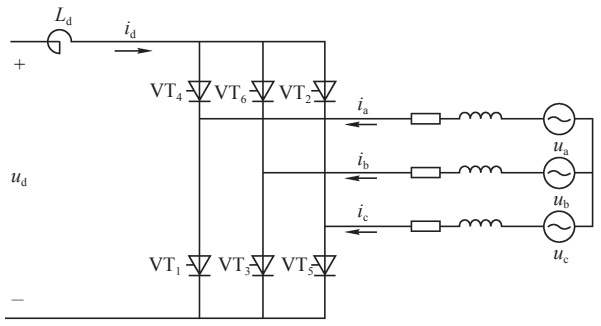

图4 6脉动逆变器原理图

Fig. 4 6 pulse inverter schematic

换流阀电流i_T、整流电压u_d和直流电流i_d；p为换流阀的触发脉冲。

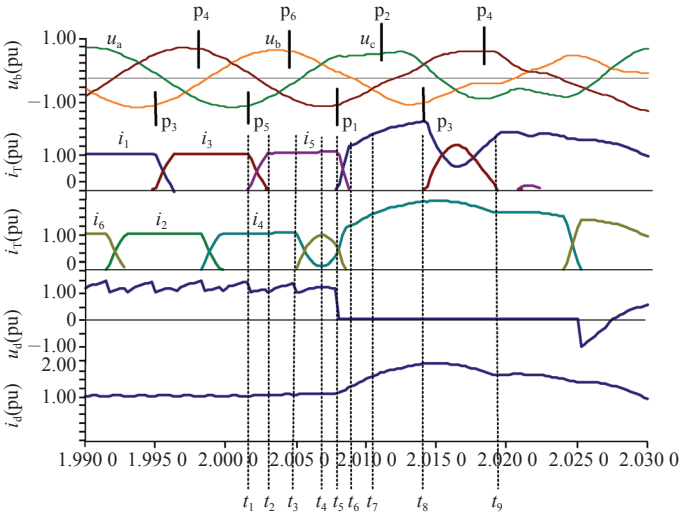

图5 换相失败期间各电气量波形

Fig. 5 Waveforms of various electrical quantities during the commutation failure

由图5可见，一个工频周期内的换相过程共有如下5个阶段。

1）t_1～t_2阶段为换流阀3向5换相过程。t_1时刻，换流阀5开始导通，换流阀3向换流阀5换相，t_2时刻换相结束，换流阀4与5导通。

2）t_3～t_4阶段为换流阀4向6换相过程。t_3时刻，换流阀6开始导通，换流阀4向换流阀6换相。由于逆变站附近的交流系统发生单相接地故障，导致换相电压幅值降低，且波形发生畸变，使换流阀4未能完成向换流阀6的换相，而在t_4时刻即发生一次换相失败之后，换流阀4继续导通，换流阀6电流则逐渐减小至零。

3）t_5～t_6阶段为换流阀5向换流阀1换相过程。t_5时刻，由于换流阀1与换流阀4同时导通，相当于直流线路末端短路，直流电流迅速增加，流经换流阀1与换流阀4的电流也随之增大。

4）t_7～t_8阶段：t_7时刻，换流阀2虽有触发脉冲，但是由于承受反压而不能导通。因此换流阀1与换流阀4 继续导通，直流短路电流将继续增大。

5）t_8～t_9阶段为换流阀1向换流阀3换相过程。由于直流电流很大，换相时间过长，使换流阀1未能完成向换流阀3的换相就承受正向电压而开始倒换相，即出现第二次换相失败，之后换流阀1与换流阀4 继续导通。

由上述分析可知，在所设置的故障条件下，6脉动逆变器共发生两次不连续换相失败，从而使得直流短路电流峰值达2 (pu)。

3.2 换相失败引发次同步振荡机理分析

通过分析上述换相过程可知，交流系统扰动使得换流母线电压幅值降低及波形畸变，导致逆变器发生换相失败，受端电网与逆变器交替形成两相短路和三相短路，换流阀电流和换流母线电流幅值接近正常值的2倍。

在换相失败发生期间，直流侧短路始终存在，短路电流全部由送端电网经过整流站及直流线路提供[11]，从而引起整流站附近汽轮发电机组轴系的扰动，对发电机的功率和转矩造成暂态冲击。汽轮发电机转子出现振荡，会在电枢绕组上感应出次同步频率的电压分量，该分量所产生的次同步频率电流又会在发电机转子上产生次同步转矩。定子感应出的次同步频率电流经过HVDC的定电流控制，将进一步改变作用在转子上的电磁转矩[12]。当汽轮发电机组电磁转矩的变化量与转子转速的变化量之间的相角差大于90° 时，转子出现电气负阻尼，从而形成正反馈性质的扭振相互作用，使得振荡幅值不断增加，最终导致汽轮发电机组轴系振荡失稳。

4 HVDC引发次同步振荡仿真分析

4.1 仿真算例

本文基于PSCAD/EMTDC仿真软件，搭建了用于研究HVDC引发次同步振荡的仿真模型，如图6所示。图6中，汽轮发电机组通过变压器与HVDC相连，机组轴系采用单刚体模型，忽略励磁及调速器的动态响应。HVDC采用CIGRE HVDC Benchmark模型，其直流额定参数为1 000 MW/500 kV/2 kA，采用单极12 脉动换流器，主要控制方式为定电流控制（整流站）和定关断角控制（逆变站）[13]。

在逆变站换流母线设置a相接地故障，故障发生于5 s，持续0.1 s。逆变站换流母线电压下

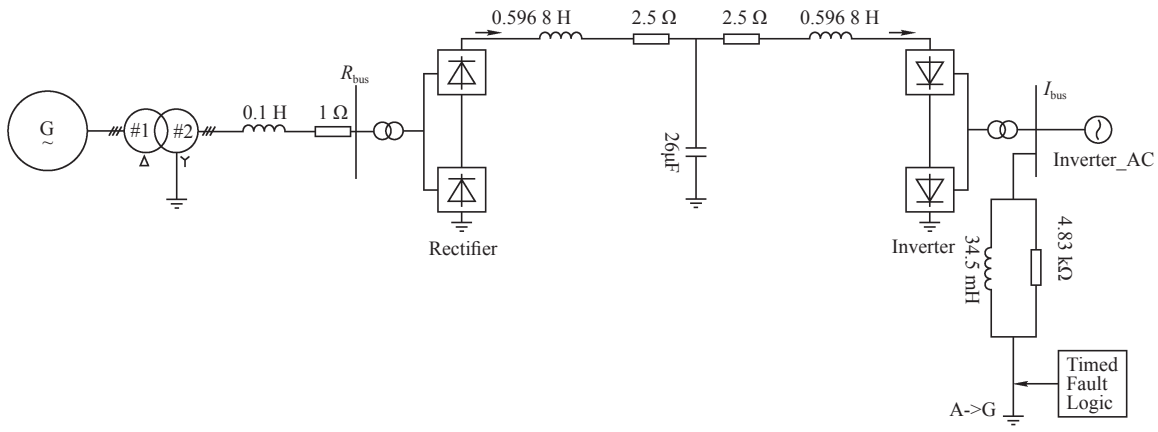

图6 HVDC次同步振荡模型

Fig. 6 SSO model of HVDC transmission

降，引起HVDC换相失败发生。图7中依次为换流母线电压U_i、直流电压U_d、直流电流I_d、直流功率P_d、整流器触发角α和逆变器关断角γ的仿真波形。

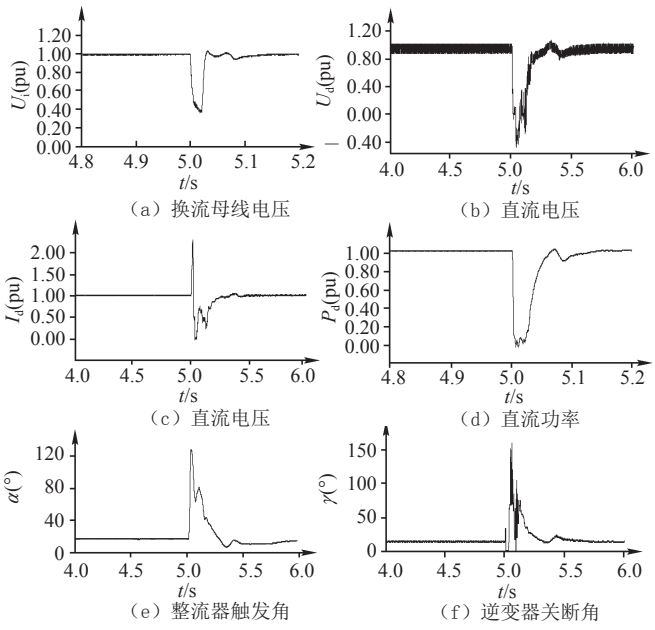

图7　换相失败时的仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform of each electric quantity when commutation fails

由图7可以看出，逆变站换流母线发生单相接地故障后，换流母线电压幅值大幅降低，造成刚关断的换流阀未能恢复关断能力，当承受正向电压时重新导通。逆变器直流电压降低后，直流电流剧增，直流功率骤降。

4.2　换相失败引发次同步振荡仿真分析

发生换相失败后，直流电流迅速增加，触发整流站的定电流控制，通过增大触发角α，以减小直流电流。同时，逆变站的定关断角控制也会通过减小触发角而期望增大关断角γ，增大直流电压。上述调整过程中，直流功率$P_d=U_dI_d$将快速变化，且偏高于额定功率。这一功率偏差经过交流系统的传递，可能引起整流侧汽轮发电机组次同步振荡现象的发生。

图8为轴系各质块间的扭矩。图9依次为汽轮发电机转子角速度ω和电磁转矩T_e的仿真波形。从图8中可以看出，5 s时换流母线发生单相接地故障导致换相失败，造成汽轮发电机组各质量块间的转矩及发电机转子的转速开始振荡，并且逐渐振荡发散。由于逆变器的换相失败引起了汽轮发电机轴系的扭振相互作用，且由于发电机转速瞬间增大，电磁转矩减小，当发电机角速度的变化量$\Delta\omega$与电磁转矩变化量ΔT_e之间的相位差超过90°时，轴系各质量块间会形成正反馈的扭振相互作用，使得振荡幅度不断增大，从而导致轴系振荡失稳。

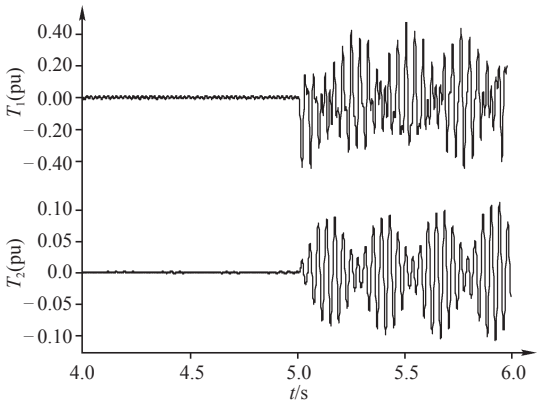

图8　轴系各质块间的扭矩

Fig. 8 Torque between the masses of the shafting

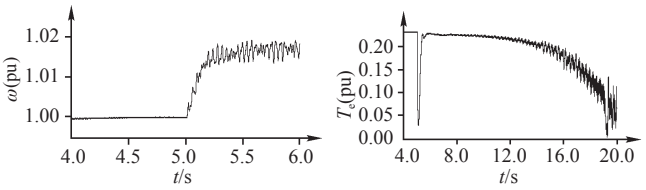

图9　发电机转子角速度和电磁转矩

Fig. 9 Generator angular velocity and electromagnetic torque

5　结束语

本文从次同步振荡原理出发，搭建适用于次同步振荡分析的汽轮发电机轴系模型，研究表明若系统对受扰轴系中各质量块的扭振产生了负阻尼，则可能引发汽轮发电机组次同步振荡现象。

HVDC引发次同步振荡的机理是HVDC控制系统对功率变化的快速作用，体现为HVDC引起整流站附近汽轮发电机组产生电气负阻尼特性。

逆变站发生换相失败时，由于直流短路电流全部由送端电网经过整流站提供，会引起整流站附近汽轮发电机组扰动，整流站控制系统

为扰动提供负阻尼，当负阻尼超过汽轮发电机所提供的机械正阻尼时，就会形成正反馈性质的扭振相互作用，最终导致次同步振荡现象的发生。

由于次同步振荡的问题是HVDC控制系统的快速作用导致的，可以从控制系统的角度来抑制由换相失败引起的汽轮机轴系扭振。例如采用恰当的控制方式，提高系统的稳定性，降低换相失败发生的概率。

参考文献

[1] 赵婉君．高压直流输电工程技术[M]．2版．北京：中国电力出版社，2011．

[2] 徐政．交直流电力系统动态行为分析[M]．北京：机械工业出版社，2004．

[3] 汤广福，罗湘，魏晓光．多端直流输电与直流电网技术[J]．中国电机工程学报，2013，33(10)：8-17，24．

[4] 程时杰，曹一家，江全元．电力系统次同步振荡的理论与方法[M]．北京：科学出版社，2009．

[5] 穆子龙，王渝红，彭灿．四川电网由高压直流输电引起的次同步振荡特性研究[J]．电力系统保护与控制，2013，41(3)：21-25．

[6] 肖湘宁．电力系统次同步振荡及其抑制方法[M]．北京：机械工业出版社，2014．

[7] 周长春，徐政．由直流输电引起的次同步振荡的阻尼特性分析[J]．中国电机工程学报，2003(10)：6-10．

[8] 杨秀，陈陈，王西田．HVDC 控制系统对汽轮发电机组次同步振荡的影响[J]．电网技术，2004，28(5)：5-8．

[9] 徐政，罗惠群，祝瑞金．电力系统次同步振荡问题的分析方法概述[J]．电网技术，1999(6)：36-39．

[10] 郭春义，赵剑，刘炜，等．抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J]．中国电机工程学报，2018，38(增刊1)：1-10．

[11] 张鹏，毕天姝．HVDC引起次同步振荡暂态扰动风险的机理分析[J]．中国电机工程学报，2016，36(4)：961-968．

[12] 张望，曹森，郭宏光，等．SSR阻尼控制器在高岭背靠背直流工程中的应用[J]．电力系统保护与控制，2009，37(15)：27-32．

[13] 张帆，徐政．直流输电次同步阻尼控制器的设计[J]．电网技术，2008(11)：13-17．

作者简介

王彤彤

王彤彤（1996－），女，硕士研究生，研究方向为高压直流输电的控制、运行分析和规划。

文俊（1963－），女，工学硕士，教授，研究方向为高压直流输电的控制、运行分析和规划。

(收稿日期：2019－03－05)EA